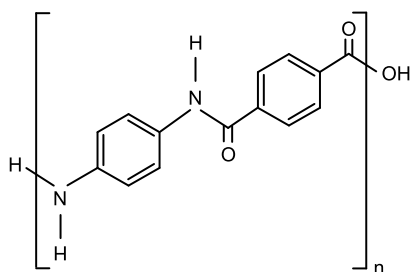


Jerzy Choma, Łukasz Osuchowski, Aleksandra Dziura, Wioletta Kwiatkowska-Wójcik, Mietek Jaroniec

Właściwości adsorpcyjne węgla aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar®

Granulowane, ziarnowe i pyłowe węgle aktywne są najczęściej otrzymywane z naturalnych surowców pochodzenia organicznego, takich jak węgiel kamienny, węgiel brunatny, torf, drewno czy pestki owoców [1–3]. Z danych literaturowych wynika również, że do otrzymywania węgla aktywnych stosowane są zarówno syntetyczne, jak i odpadowe polimery [4]. Najczęściej do otrzymywania węgla aktywnych wykorzystuje się takie materiały polimerowe, jak poli(chlorek winylidenu i chlorek winylu) – Saran®, poli(tereftalan etylenu) – PET, sulfonowana żywica styrenowo-diwinilobenzenowa – np. Amberjet™ czy żywica fenolowo-formaldehydowa. Do otrzymywania aktywnych włókien węglowych niekiedy wykorzystywane są włókna z poli(tereftalano-1,4-fenyloamidu) – znane pod nazwą handlową Kevlar®. Polimer ten należy do grupy aramidów, a włókna z niego wykonane charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie. Wzór chemiczny poli(tereftalano-1,4-fenyloamidu) jest następujący:



Warto podkreślić, że włókno Kevlar® zostało otrzymane w laboratoriach firmy DuPont w 1965 r. przez zespół badaczy pod kierownictwem Stephanie Kwolek, chemiczki polskiego pochodzenia. Wśród bardzo wielu różnych zastosowań, włókna tego typu wykorzystywane są także do otrzymywania aktywnych włókien węglowych [5,6]. W tym celu po procesie karbonizacji tych włókien zastosowano procesy ich fizycznej i chemicznej aktywacji. W procesie

fizycznej aktywacji zastosowano dwutlenek węgla i parę wodną, natomiast aktywację chemiczną prowadzono za pomocą kwasu ortofosforowego (H_3PO_4). W najlepszym wypadku włókna węglowe aktywowane za pomocą CO_2 miały powierzchnię właściwą BET równą $100\text{ m}^2/\text{g}$, a objętość mikroporów $0,05\text{ cm}^3/\text{g}$, aktywowane parą wodną odpowiednio $460\text{ m}^2/\text{g}$ i $0,24\text{ cm}^3/\text{g}$, natomiast aktywowane za pomocą H_3PO_4 – $400\text{ m}^2/\text{g}$ i $0,21\text{ cm}^3/\text{g}$ [6]. O ile w wypadku aktywacji fizycznej za pomocą CO_2 i pary wodnej powierzchnia włókna nie ulegała zmianie, to w przypadku aktywacji chemicznej za pomocą H_3PO_4 powierzchnia włókien w znacznym stopniu uległa uszkodzeniu.

W niniejszej pracy scharakteryzowano właściwości i określono wartości parametrów adsorpcyjnych pyłowych węgla aktywnych otrzymanych w wyniku aktywacji odpadowych włókien Kevlar® za pomocą wodorotlenku sodu.

Część doświadczalna

W pierwszym etapie 5 g włókien Kevlar® firmy DuPont suszono w temperaturze 100°C w ciągu 3 h w suszarce laboratoryjnej, a następnie karbonizowano je w piecu elektrycznym w temperaturze 500°C w ciągu 30 min w atmosferze przepływającego azotu ($0,9\text{ dm}^3/\text{min}$). Proces aktywacji materiału węglowego (karbonizatu) prowadzono w następujący sposób: 1 g materiału węglowego mieszano z rozdrobnionym wodorotlenkiem potasu (POCh, Polska) w czterech proporcjach (KOH:materiał węglowy) równych 2:1, 3:1, 4:1 i 5:1. Tak otrzymaną mieszaninę umieszczano w tyglach niklowych w piecu elektrycznym i ogrzewano do temperatury 700°C z szybkością $20^\circ\text{C}/\text{min}$ i jeszcze przez 30 min w tej temperaturze w atmosferze przepływającego azotu ($0,9\text{ dm}^3/\text{min}$). Ochłodzony węgiel aktywny zalewano 30 cm^3 35% kwasu solnego (POCh, Polska) i poddawano działaniu ultradźwięków w myjce w ciągu około 1 h. Następnie węgiel aktywny odsączono na lejku Schotta i przemywano wodą destylowaną, aż do uzyskania obojętnego pH przesącza. Na zakończenie węgiel aktywny suszono w temperaturze 100°C w ciągu 24 h w suszarce laboratoryjnej. Otrzymane węgle aktywne oznaczono następującymi symbolami (odpowiadającymi stosunkowi KOH/karbonizat): KEV-2, KEV-3, KEV-4 i KEV-5.

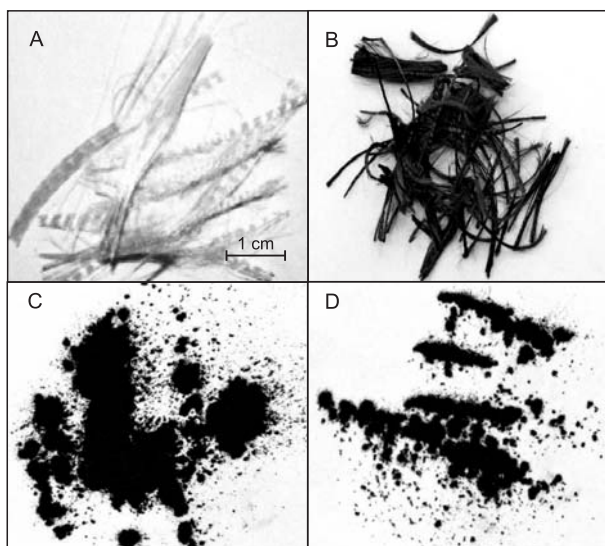
Na rysunku 1 przedstawiono fotografie (wykonane aparatem cyfrowym Canon 500D) wyjściowych włókien Kevlar®, włókien skarbonizowanych oraz dwóch węgla aktywnych otrzymanych w wyniku aktywacji za pomocą KOH – KEV-4 i KEV-5. Wszystkie badane preparaty różniły się między sobą morfologią – Kevlar® miał strukturę cienkich

Prof. dr hab. inż. J. Choma, dr inż. A. Dziura: Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Zakład Chemii, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, jchoma@wat.edu.pl, adzura@wat.edu.pl

Mgr inż. Ł. Osuchowski: Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii, al. gen. Antoniego Chruściela „Montera” 105, 00-910 Warszawa, losuchowski@wicher.waw.pl

Dr inż. W. Kwiatkowska-Wójcik: Przedsiębiorstwo Sprzętu Ochronnego MASKPOL SA, Konieczki, 42-140 Panki, wioletta.wojcik@maskpol.com.pl

Prof. dr hab. M. Jaroniec: Kent State University, Department of Chemistry and Biochemistry, Kent, Ohio 44-242 USA, jaroniec@kent.edu



Rys. 1. Fotografie wyjściowych włókien Kevlar® (A) i karbonizatu (B) oraz węgla aktywnego KEV-4 (C) i KEV-5 (D)

Fig. 1. Pictures of the initial Kevlar® fibers (A), carbonized fibers (B) as well as active carbons KEV-4 (C) and KEV-5 (D)

włókien barwy żółtej (A), karbonizat zachował strukturę włóknistą o barwie czarnej (B), natomiast węgle aktywne (C) i (D) miały strukturę drobnego czarnego proszku.

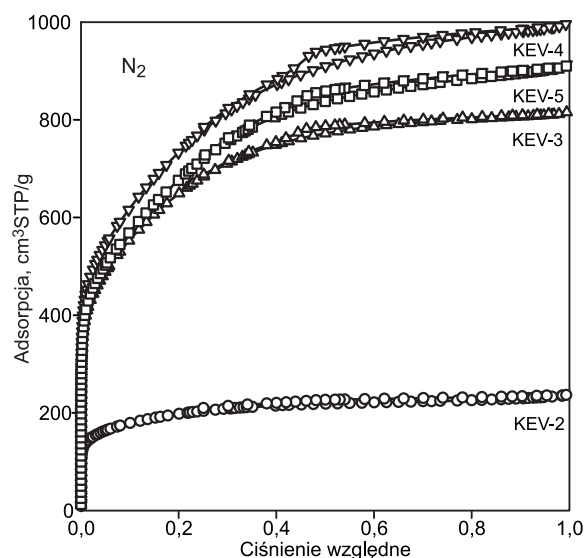
Izotermie adsorpcji (N_2 w temp. $-196^\circ C$, CO_2 w temp. $0^\circ C$ i $25^\circ C$, CH_4 w temp. $20^\circ C$ i H_2 w temp. $-196^\circ C$) wyznaczono za pomocą objętościowego analizatora powierzchni i porowatości ASAP 2020 firmy Micromeritics Instrument Corp. (Norcross, GA, USA). Izotermie adsorpcji C_6H_6 wyznaczono w temperaturze $20^\circ C$ metodą gramimetryczną za pomocą wagi sorpcyjnych McBaina-Bakra z kwarcowymi spiralami własnej konstrukcji. Wszystkie badane próbki materiałów węglowych przed pomiarami adsorpcyjnymi odgazowano w temperaturze $200^\circ C$ w ciągu 2 h pod zmniejszonym ciśnieniem.

Omówienie wyników badań

Adsorpcja N_2

Najważniejszym celem pracy było otrzymanie z odpadowych włókien Kevlar® węgla aktywnych o bardzo dobrze rozwiniętej powierzchni właściwej i dużej objętości porów z możliwie jak najlepiej rozwiniętą mikroporowatością. Na rysunku 2 przedstawiono niskotemperaturowe izotermie adsorpcji–desorpcji azotu na węglach aktywnych otrzymanych w wyniku aktywacji za pomocą KOH skarbonizowanych włókien Kevlar®. Wszystkie izotermie, według klasyfikacji IUPAC [7], można zaliczyć do typu I z pętlami histerezy typu H4. Jak wynika z przebiegu doświadczalnych izoterm adsorpcji, ilość zaadsorbowanego azotu zwiększała się regularnie wraz ze wzrostem stosunku ilości użytego KOH do ilości materiału węglowego od 2:1, przez 3:1 aż do 4:1, by następnie ulec zmniejszeniu przy stosunku 5:1. Izoterma adsorpcji azotu na węglu aktywnym KEV-5 leżała pomiędzy izotermami adsorpcji azotu na węglach KEV-4 i KEV-3.

Na podstawie niskotemperaturowych izoterm adsorpcji azotu określono powierzchnię właściwą (S_{BET}) badanych węgla aktywnych metodą Brunauera-Emmetta-Tellera [8]. Powierzchnię tę wyznaczono w przedziale ciśnień względnych od 0,05 do 0,20 z zastosowaniem powierzchni zajmowanej przez pojedynczą cząsteczkę azotu w monowarstwie



Rys. 2. Izotermie adsorpcji–desorpcji azotu na węglach aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar® po karbonizacji i aktywacji za pomocą KOH

Fig. 2. Nitrogen adsorption-desorption isotherms for active carbons obtained from Kevlar® fibers following their carbonization and KOH activation

równej $0,162 \text{ nm}^2$. Całkowitą objętość porów (V_t) węgla aktywnych wyznaczono przekształcając objętość zaadsorbowanego azotu (w $\text{cm}^3 \text{ STP/g}$) przy ciśnieniu względnym $p/p_0=0,99$ w objętość ciekłego azotu (w cm^3/g) równą objętości porów wypełnionych tą cieczą [9].

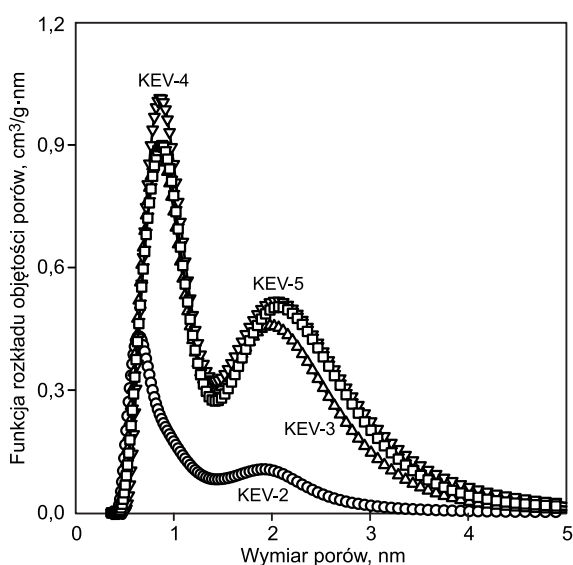
W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów struktury porowatej badanych węgla aktywnych uzyskane na podstawie niskotemperaturowych izoterm adsorpcji azotu. Otrzymane węgle aktywne charakteryzowały się dużymi wartościami powierzchni właściwej, przy czym największą miał węgiel KEV-4 – $2660 \text{ m}^2/\text{g}$. Całkowita objętość porów otrzymanych węgla (V_t) była również duża, największa w przypadku węgla KEV-4 – $1,54 \text{ cm}^3/\text{g}$. Analizując wartości S_{BET} i V_t warto podkreślić, że najlepsze rezultaty aktywacji uzyskano stosując czterokrotny nadmiar masy KOH w stosunku do masy karbonizatu. Warto również zaznaczyć, że wartości S_{BET} i V_t zmieniały się w funkcji stosunku KOH:węgiel w następujący sposób: początkowo zwiększały się (od KEV-2 do KEV-4), a następnie malały (KEV-5).

Funkcje rozkładu objętości porów badanych węgla aktywnych wyznaczono na podstawie niskotemperaturowych izoterm adsorpcji stosując nieliniową metodę z teorii funkcjonalności gęstości (density functional theory – DFT) dotyczącą niejednorodnych powierzchni, zaproponowaną przez autorów prac [10, 11], przy czym do obliczeń funkcji rozkładu objętości porów wykorzystano program numeryczny SAIEUS (autor: J. Jagiełło). Badania porównawcze różnych metod analizy porowatości pokazały, że wykorzystanie DFT pozwala lepiej ocenić porowatość tych materiałów [12]. Różniczkowe funkcje rozkładu objętości porów badanych węgla aktywnych wyznaczone metodą DFT przedstawiono na rysunku 3. Składają się one z dwóch pików – pierwszy w przypadku małych wymiarów porów odpowiada w przybliżeniu rozkładowi objętości ultramikroporów, natomiast drugi w przypadku większych porów odpowiada rozkładowi mikroporów i małych mezoporów. Funkcje różniczkowego rozkładu objętości porów dobrze ilustrują zmiany wynikające z przebiegu procesu aktywacji węgla za pomocą KOH. Obserwowano rozwój struktury mikroporowatej.

Tabela 1. Parametry struktury porowatej węgla aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar®
wyznaczone na podstawie niskotemperaturowych izoterm adsorpcji azotu
Table 1. Porous structure parameters of active carbons obtained from Kevlar® fibers
calculated on the basis of low temperature nitrogen adsorption isotherms

Węgiel aktywny	S_{BET} m ² /g	V_t cm ³ /g	w_1 nm	w_2 nm	w_{r1} nm	V_1 cm ³ /g	w_{r2} nm	V_2 cm ³ /g	S m ² /g	Mikroporowatość %
KEV-2	700	0,37	0,64	1,93	1,45	0,20	3,51	0,31	650	85
KEV-3	1830	1,26	0,71	1,98	1,42	0,51	4,01	1,12	1750	89
KEV-4	2660	1,54	0,85	2,07	1,42	0,54	5,00	1,35	1920	88
KEV-5	2450	1,41	0,87	2,07	1,42	0,50	4,79	1,23	1800	88

S_{BET} – powierzchnia właściwa BET, V_t – całkowita objętość porów wyznaczona na podstawie pojedynczego punktu na izotermie adsorpcji, w_1 – wymiar ultramikroporów odpowiadający maksimum pierwszego piku funkcji rozkładu objętości porów wyznaczonej metodą DFT, w_2 – wymiar mikroporów i małych mezoporów odpowiadający maksimum drugiego piku funkcji rozkładu objętości porów wyznaczonej metodą DFT, V_1 – objętość ultramikroporów wyznaczona za pomocą metody DFT, w_{r1} – wymiar porów odpowiadający minimum pierwszego piku, V_2 – objętość mikroporów i małych mezoporów wyznaczona metodą DFT, w_{r2} – wymiar porów określający zakończenie drugiego piku funkcji rozkładu objętości porów, S – całkowita powierzchnia właściwa wyznaczona za pomocą metody DFT, Mikroporowatość – udział procentowy objętości mikroporów (V_2) wyznaczonej metodą DFT w całkowitej objętości porów (V_t) wyznaczonej na podstawie pojedynczego punktu na izotermie



Rys. 3. Funkcje rozkładu objętości porów węgla aktywnych otrzymanych z włókien z Kevlar® po karbonizacji i aktywacji za pomocą KOH

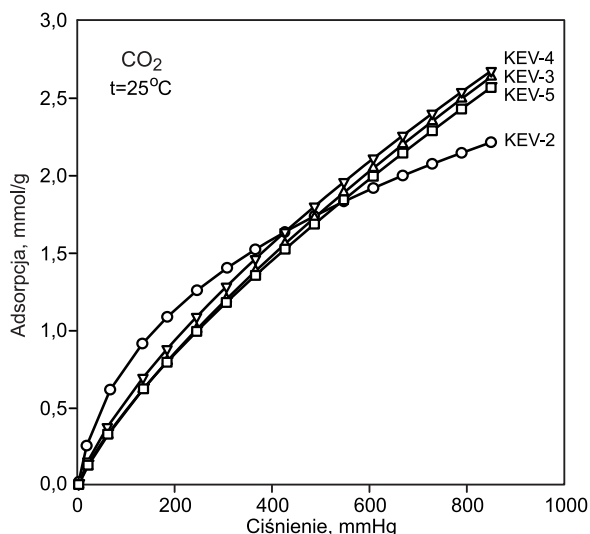
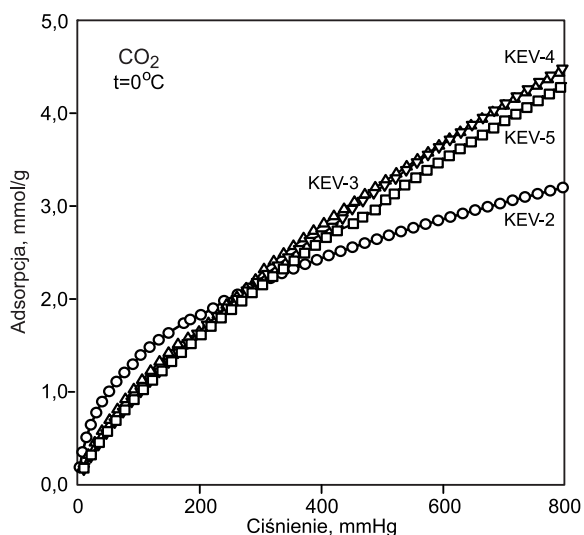
Fig. 3. Pore size distribution functions for active carbons obtained from Kevlar® fibers following their carbonization and KOH activation

Tabela 1 zawiera wartości odpowiadające położeniu maksimum pierwszego (w_1) i drugiego (w_2) piku. Maksyma ultramikroporów znajdowały się w przedziale od 0,64 nm do 0,87 nm, natomiast maksima większych mikroporów w przedziale od 1,93 nm do 2,07 nm. Wykorzystując funkcje rozkładu objętości porów wyznaczone metodą DFT określono objętość ultramikroporów (V_1) w przypadku wymiaru porów zmieniającego się w przedziale od zera do w_{r1} , odpowiadającego wymiarowi minimum za pierwszym pikiem oraz objętość mikroporów i małych mezoporów (V_2) w przypadku wymiaru mikroporów od zera do w_{r2} , odpowiadającego wymiarowi porów za drugim pikiem. Ponadto wykorzystując metodę DFT wyznaczono również całkowitą powierzchnię właściwą (S) badanych węgli aktywnych odpowiadającą wymiarowi zarówno mikroporów, jak i mezoporów. Wymiar ultramikroporów (w_{r1}), odpowiadający minimum za pierwszym pikiem, praktycznie nie zmieniał się w przypadku wszystkich badanych węgli aktywnych wynosił około 1,4 nm, natomiast wymiar mikroporów za drugim pikiem zwiększał się wraz ze wzrostem ilości KOH użytego do aktywacji od 3,51 nm (węgiel

KEV-2) do około 5,00 nm (węgiel KEV-4). Jak zaznaczono wcześniej, na podstawie funkcji rozkładu objętości porów wyznaczonych metodą DFT, odpowiadających zakończeniu pierwszego (w_{r1}) i drugiego piku (w_{r2}), określono objętość ultramikroporów (V_1) i mikroporów wraz z małymi mezoporami (V_2). Wartości objętości ultramikroporów zmieniały się w przedziale od 0,20 cm³/g (węgiel KEV-2) do 0,54 cm³/g (węgiel KEV-4) i można je ocenić – w porównaniu z innymi węglami aktywnymi otrzymywanymi z polimerów odpadowych – jako średnie. Objętość mikroporów, odpowiadająca wymiarowi tych porów zmieniającemu się w przedziale od zera do w_{r2} , przyjmowała natomiast wartości w przedziale od 0,31 cm³/g (węgiel KEV-2) do 1,35 cm³/g (węgiel KEV-4). Wartości te, szczególnie w przypadku górnej granicy przedziału, można ocenić jako duże. Na podstawie udziału objętości mikroporów w całkowitej objętości porów obliczono mikroporowatość (tab. 1), która w przypadku wszystkich badanych węgli aktywnych była bliska 90%, czyli węgle te były głównie mikroporowate. Wartości powierzchni właściwej badanych węgli aktywnych wyznaczone metodą DFT zmieniały się w przedziale od 650 m²/g (węgiel KEV-2) do 1920 m²/g (węgiel KEV-4). Były to wartości duże, choć nieco mniejsze od wartości wyznaczonych metodą BET.

Adsorpcja CO₂

Adsorpcję dwutlenku węgla na wybranych węglach aktywnych z odpadowych włókien Kevlar® mierzono w temperaturze 0°C i 25°C przy ciśnieniu osiagającym odpowiednio wartości 800 mmHg i 850 mmHg. Na rysunku 4 pokazano wyznaczone izoterm adsorpcji CO₂ (w mmol/g) na wszystkich badanych węglach aktywnych w odpowiednich temperaturach. Początkowo maksymalna ilość zaadsorbowanego CO₂ wzrastała wraz ze wzrostem użytej ilości KOH w kolejności od węgla aktywnego KEV-2 do KEV-4. Maksimum ilości zaadsorbowanego CO₂ zarówno w temperaturze 0°C jak i 25°C zaobserwowano w przypadku węgla KEV-4, natomiast kolejny węgiel KEV-5 charakteryzował się mniejszą wartością maksymalnej adsorpcji CO₂. Konsekwentnie największe ilości zaadsorbowanego CO₂ zaobserwowano w przypadku węgla aktywowanego za pomocą KOH – KEV-4, który miał największe wartości parametrów strukturalnych (S_{BET} , V_t , V_1 , V_2 i S). W tabeli 2 porównano maksymalne ilości CO₂, H₂, CH₄ i C₆H₆ zaadsorbowane na poszczególnych węglach aktywnych.



Rys. 4. Izotermy adsorpcji dwutlenku węgla na węglach aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar® po karbonizacji i aktywacji za pomocą KOH

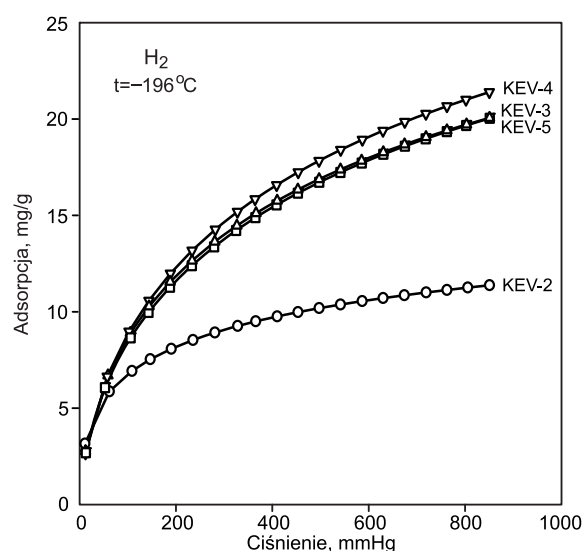
Fig. 4. Carbon dioxide adsorption isotherms for active carbons obtained from Kevlar® fibers following their carbonization and KOH activation

Adsorpcja H₂

Adsorpcję wodoru mierzono w temperaturze -196°C i pod ciśnieniem wzrastającym do około 850 mmHg. Na rysunku 5 pokazano izotermy adsorpcji wodoru na węglach aktywnych otrzymanych z odpadowego włókna kevlarowego. Podobnie do adsorpcji CO₂, maksymalna ilość zaadsorbowanego H₂ pod ciśnieniem 850 mmHg regularnie rosła w kolejności od węgla KEV-2 do KEV-4, aby następnie nieco zmaleć w przypadku węgla KEV-5. Największą ilość zaadsorbowanego wodoru przy ciśnieniu 850 mmHg zarejestrowano na węglu KEV-4 – 21,4 mg/g.

Adsorpcja CH₄

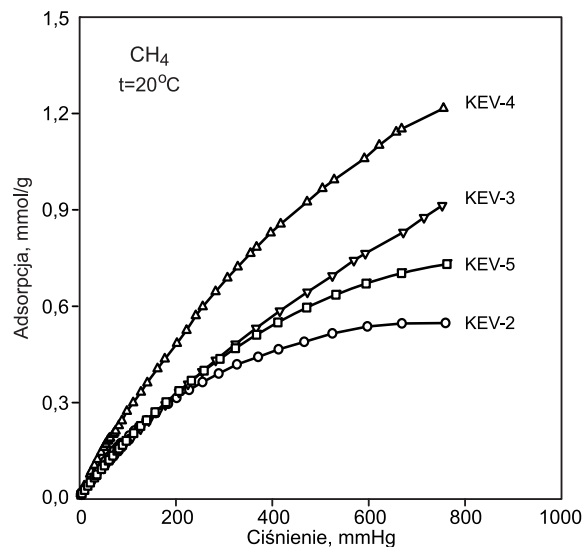
Adsorpcję metanu mierzono w temperaturze 20°C i pod ciśnieniem wzrastającym do około 750 mmHg. Na rysunku 6 pokazano izotermy adsorpcji metanu na badanych węglach aktywnych. Podobnie jak w wypadku adsorpcji CO₂ i H₂, ilość zaadsorbowanego metanu regularnie rosła w kolejności od węgla KEV-2 do KEV-4, aby następnie nieco zmaleć w przypadku węgla KEV-5. Warto zwrócić uwagę na różnice między poszczególnymi izotermami adsorpcji



Rys. 5. Izotermy adsorpcji wodoru na węglach aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar® po karbonizacji i aktywacji za pomocą KOH

Fig. 5. Hydrogen adsorption isotherms for active carbons obtained from Kevlar® fibers following their carbonization and KOH activation

metanu na badanych węglach aktywnych, gdyż były one nieco większe niż różnice między izotermami adsorpcji CO₂ i H₂ na tych węglach. Największą ilość zaadsorbowanego metanu przy ciśnieniu 750 mmHg zarejestrowano na węglu aktywnym KEV-4 – 1,21 mmol/g.



Rys. 6. Izotermy adsorpcji metanu na węglach aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar® po karbonizacji i aktywacji za pomocą KOH

Fig. 6. Methane adsorption isotherms for active carbons obtained from Kevlar® fibers following their carbonization and KOH activation

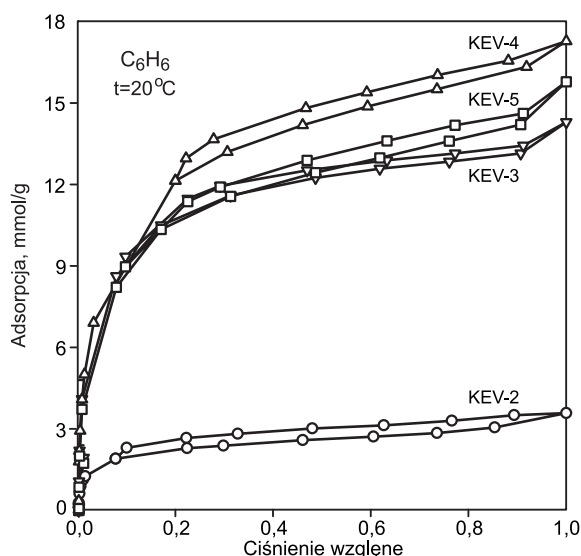
Adsorpcja C₆H₆

Dość często badania adsorpcji benzenu na węglach aktywnych są reprezentatywne w stosunku do adsorpcji lotnych związków organicznych (volatile organic compounds – VOCs). Ma to szczególne znaczenie w wypadku lotnych toksycznych związków organicznych. Adsorpcję C₆H₆ na węglach aktywnych otrzymanych z włókna Kevlar® badano w temperaturze 20°C w funkcji ciśnienia par benzenu za pomocą wag sorpcyjnych McBain-Bakra.

Tabela 2. Maksymalna adsorpcja CO₂, H₂, CH₄ i C₆H₆ na węglach aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar®
Table 2. Maximum adsorption of CO₂, H₂, CH₄ and C₆H₆ on active carbons obtained from Kevlar® fibers

Węgiel aktywny	CO ₂ , mmol/g		H ₂ , mg/g t=-196°C, p≈850 mmHg	CH ₄ , mmol/g t=20°C, p≈750 mmHg	C ₆ H ₆ , mmol/g t=20°C, p/p ₀ ≈1,0
	t=0°C, p≈800 mmHg	t=25°C, p≈850 mmHg			
KEV-2	3,19	2,22	11,4	0,54	3,58
KEV-3	4,43	2,64	20,1	0,91	14,3
KEV-4	4,47	2,68	21,4	1,21	17,3
KEV-5	4,27	2,60	20,1	0,73	15,8

Na rysunku 7 pokazano wyznaczone izotermy adsorpcji C₆H₆ w funkcji ciśnienia względnego (p/p₀) par benzenu. Jak wynika z tego rysunku, najlepszymi właściwościami względem benzenu charakteryzował się węgiel aktywny KEV-4, a najslabszymi węgiel KEV-2. Wartość adsorpcji par benzenu na węglu KEV-4 przy ciśnieniu względnym bliskim 1,0 była bardzo duża i wynosiła 17,3 mmol/g.



Rys. 7. Izotermy adsorpcji benzenu na węglach aktywnych otrzymanych z włókien Kevlar® po karbonizacji i aktywacji za pomocą KOH

Fig. 7. Benzene adsorption isotherms for active carbons obtained from Kevlar® fibers following their carbonization and KOH activation

Podsumowanie

Serię czterech mikroporowatych węgli aktywnych otrzymano w wyniku karbonizacji, a następnie aktywacji za pomocą KOH odpadowych włókien Kevlar®. Otrzymane w ten sposób węgle aktywne charakteryzowały się dużą objętością ultramikroporów i mikroporów oraz bardzo dużą powierzchnią właściwą. Bardzo dobrze rozwinięta struktura mikroporowata tych węgli aktywnych spowodowała, że w znacznych ilościach adsorbowały one dwutlenek węgla, wodór, metan i benzen. Najlepszy z węgli – KEV-4 – adsorbował CO₂ w ilościach 4,47 mmol/g (0°C; 800 mmHg) i 2,68 mmol/g (25°C; 850 mmHg), H₂ w ilości 21,4 mg/g (-196°C; 850 mmHg), CH₄ w ilości 1,21 mmol/g (20°C; 750 mmHg) oraz C₆H₆ w ilości 17,3 mmol/g (20°C; p/p₀≈1,0). Rozwinięcie struktury mikroporowatej węgla aktywnego KEV-4 otrzymanego w wyniku aktywacji za pomocą KOH (w stosunku 4:1 względem karbonizatu) można najlepiej ocenić na podstawie wartości najważniejszych parametrów opisujących tę strukturę – powierzchnia właściwa S_{BET}=2660 m²/g, całkowita objętość porów

V_t=1,54 cm³/g, objętość ultramikroporów V₁=0,54 cm³/g i objętość mikroporów wraz z małymi mezoporami V₂=1,35 cm³/g. Bardzo dobre właściwości adsorpcyjne mikroporowatych węgli aktywnych otrzymanych z odpadowych włókien Kevlar® względem CO₂, H₂, CH₄ i C₆H₆ powodują, że mogą być one z powodzeniem stosowane do adsorpcji dwutlenku węgla i lotnych związków organicznych (VOCs), a także do gromadzenia i wykorzystania energii zaadsorbowanego wodoru.

Prof. J. Choma, mgr Ł. Osuchowski, dr A. Dziura – projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2013/09/B/ST5/00076.

LITERATURA

- H. JANKOWSKA, A. ŚWIĄTKOWSKI, J. CHOMA: Active Carbon. Ellis Horwood Ltd., Chichester 1991.
- R.C. BANSAL, M. GOYAL: Activated Carbon Adsorption. CRC Press, Boca Raton 2005.
- H. MARSH, F. RODRIGUEZ-REINOSO: Activated Carbons. Elsevier, Amsterdam 2006.
- J. CHOMA, Ł. OSUCHOWSKI, M. JARONIEC: Właściwości i zastosowanie węgli aktywnych otrzymanych z materiałów polimerowych (Application of activated carbons obtained from polymeric materials). *Ochrona Środowiska* 2014, vol. 36, nr 2, ss. 3–16.
- A.L. CUKIERMAN: Development and environmental applications of activated carbon cloths. *ISRN Chemical Engineering* 2013, Vol. 2013, ID 261523, pp. 1–31.
- L. GIRALDO, Y. LADINO, J.C.M. PIRAJANC, M.P. RODRIGUEZ: Synthesis and characterization of activated carbon fibres from Kevlar. *Eletica Quimica Sao Paulo* 2007, Vol. 32, No. 4, pp. 55–62.
- K.S.W. SING, D.H. EVERETT, R.A.W. HAUL, L. MOSCOU, R.A. PIEROTTI, J. ROUQUEROL, T. SIEMIENIEWSKA: Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry* 1985, Vol. 57, pp. 603–619.
- S. BRUNAUER, P.H. EMMETT, E. TELLER: Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 1938, Vol. 60, pp. 309–319.
- S.J. GREGG, K.S.W. SING: Adsorption, Surface Area and Porosity, 2nd Ed. Academic Press, New York 1982.
- J. JAGIEŁŁO, J.P. OLIVIER: 2D-NLDFT Adsorption models for carbon slit-shaped pores with surface energetical heterogeneity and geometrical corrugation. *Carbon* 2013, Vol. 55, pp. 70–80.
- J. JAGIEŁŁO, J.P. OLIVIER: Carbon slit pore model incorporating surface energetical heterogeneity and geometrical corrugation. *Adsorption* 2013, Vol. 19, pp. 777–783.
- M. KRUK, M. JARONIEC, J. CHOMA: Comparative analysis of simple and advanced methods for assessment of microporosity in activated carbons. *Carbon* 1998, Vol. 36, pp. 1447–1458.

Choma, J., Osuchowski, L., Dziura, A., Kwiatkowska-Wójcik, W., Jaroniec, M. Adsorption Properties of Active Carbons Obtained from Kevlar® Fibers. *Ochrona Środowiska* 2014, Vol. 36, No. 4, pp. 3–8.

Abstract: A series of four microporous carbons was obtained from Kevlar® fibers by carbonization followed by KOH activation. The resulting powdered activated carbons possessed a well-developed porous structure. Their maximum specific surface area was $2660\text{m}^2/\text{g}$ while the total pore volume was of $1.54\text{cm}^3/\text{g}$. The controlled process of carbonization and activation led to a significant ultramicro-pore and micropore development, the volume of which reached $0.54\text{cm}^3/\text{g}$ and $1.35\text{cm}^3/\text{g}$, respectively. Measurements of physical adsorption of different substances

demonstrated the following adsorption efficacy: CO_2 – 4.47mmol/g (0°C , 800mmHg) and 2.68mmol/g (25°C , 850mmHg), H_2 – 21.4mg/g (-196°C , 850mmHg), CH_4 – 1.21mmol/g (20°C , 750mmHg) and C_6H_6 – 17.3mmol/g (20°C , $p/p_0 \approx 1.0$). Very good adsorption properties of microporous carbons obtained from Kevlar® fibers indicated that they might be successfully used in environmental engineering for adsorption and storage of carbon dioxide as well as volatile organic compounds. Other applications are associated with storage and usage of the energy of adsorbed hydrogen.

Keywords: PPTA polymer, carbonization, KOH activation, microporous carbon, N_2 , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_6H_6 adsorption.